ReGeo ISSN: 2177-3246

QUALIDADE FÍSICA E ESTRUTURA POROSA DE UM LATOSSOLO AMARELO SOB DIFERENTES MANEJOS NO MUNICÍPIO DE PARGOMINAS-PA

PHYSICAL QUALITY AND POROUS STRUCTURE OF A YELLOW LATOSOL UNDER DIFFERENT MANAGEMENT PRACTICES IN THE MUNICIPALITY OF PARGOMINAS, PA

CALIDAD FÍSICA Y ESTRUCTURA POROSA DE UN LATOSOL AMARILLO BAJO DIFERENTES MANEJOS EN EL MUNICIPIO DE PARGOMINAS-PA

https://doi.org/10.56238/revgeov17n8-164

Data de submissão: 03/07/2026 **Data de publicação:** 17/08/2026

Eduardo Jorge Maklouf Carvalho
Doutor em Solos e Nutrição de Plantas
Instituição: Embrapa Amazônia Oriental
E-mail: eduardo.maklouf@embrapa.br

Raimundo Cosme de Oliveira Junior
Doutor em Geoquímica Ambiental
Instituição: Embrapa Amazônia Oriental
E-mail: raimundo.oliveira-junior@embrapa.br

Carlos Alberto Costa Veloso
Doutor em Solos e Nutrição de Plantas
Instituição: Embrapa Amazônia Oriental
E-mail: carlos.veloso@embrapa.br

Arystides Resende Silva
Doutor em Solos e Nutrição de Plantas
Instituição: Embrapa Milho e Sorgo
E-mail: arystides.silva@embrapa.br

RESUMO

A conversão da floresta amazônica em sistemas agrícolas modifica a estrutura do solo, podendo comprometer processos fundamentais relacionados à infiltração de água, aeração, crescimento radicular e sustentabilidade dos agroecossistemas. Entretanto, ainda são escassos estudos que avaliem de forma integrada como diferentes sistemas de uso e manejo alteram os atributos físicos de Latossolos altamente intemperizados da Amazônia Oriental. O objetivo deste estudo foi avaliar os efeitos da floresta nativa, pastagem, plantio convencional e plantio direto sobre a matéria orgânica, densidade do solo, porosidade total, microporosidade e macroporosidade de um Latossolo Amarelo muito argiloso localizado no município de Paragominas, Pará. O experimento foi conduzido em delineamento inteiramente casualizado, utilizando amostras deformadas e indeformadas coletadas em seis profundidades, entre 0,00 e 0,80 m. Os atributos físicos foram determinados segundo metodologias padronizadas da Embrapa, e os resultados submetidos à análise estatística pelo teste de Scott-Knott ($p \leq 0,05$). Os maiores teores de matéria orgânica e de porosidade total foram observados na floresta nativa e na pastagem, enquanto a maior densidade do solo ocorreu principalmente na pastagem e no plantio direto. A microporosidade apresentou pequena variação entre os sistemas de manejo, indicando forte controle exercido pela mineralogia e pela microestrutura dos agregados. Em contrapartida, a macroporosidade mostrou elevada sensibilidade às alterações promovidas pelo manejo, constituindo o

atributo físico mais responsivo às modificações estruturais do solo. A interpretação integrada dos resultados demonstrou que a matéria orgânica atua como principal agente estabilizador da estrutura do solo, enquanto a densidade e a macroporosidade refletem diretamente a intensidade das intervenções antrópicas. Conclui-se que avaliações integradas dos atributos físicos permitem compreender de forma mais consistente a qualidade estrutural de Latossolos amazônicos, fornecendo subsídios para o desenvolvimento de sistemas de manejo mais sustentáveis na Amazônia Oriental.

Palavras-chave: Qualidade Física do Solo. Latossolo Amarelo. Plantio Direto. Porosidade do Solo. Amazônia Oriental.

ABSTRACT

The conversion of Amazon forests into agricultural systems alters soil structure and may affect key processes related to water infiltration, aeration, root development, and the long-term sustainability of agroecosystems. However, integrated assessments of how contrasting land-use systems influence the physical quality of highly weathered Oxisols in the Eastern Amazon remain limited. This study evaluated the effects of native forest, pasture, conventional tillage, and no-tillage systems on soil organic matter, bulk density, total porosity, microporosity, and macroporosity in a very clayey Yellow Oxisol located in Paragominas, Pará State, Brazil. The experiment was conducted using a completely randomized design with disturbed and undisturbed soil samples collected from six depth intervals between 0.00 and 0.80 m. Soil physical properties were determined following standardized Embrapa procedures, and treatment means were compared using the Scott-Knott test at the 5% significance level. Native forest and pasture exhibited the highest soil organic matter contents and total porosity, whereas the greatest bulk density values were generally observed under pasture and no-tillage. Microporosity showed little variation among land-use systems, indicating strong control by soil mineralogy and aggregate microstructure. In contrast, macroporosity was highly responsive to management practices and proved to be the most sensitive indicator of structural changes in the soil. The integrated analysis demonstrated that soil organic matter acts as the main stabilizing agent of soil structure, whereas bulk density and macroporosity directly reflect the intensity of anthropogenic disturbance. These findings highlight that integrated evaluation of soil physical attributes provides a more comprehensive assessment of the structural quality of highly weathered Amazonian Oxisols and supports the development of more sustainable land management strategies for the Eastern Amazon.

Keywords: Soil Physical Quality. Yellow Oxisol. No-tillage. Soil Porosity. Eastern Amazon.

RESUMEN

La conversión del bosque amazónico en sistemas agrícolas modifica la estructura del suelo, pudiendo comprometer procesos fundamentales relacionados con la infiltración de agua, aireación, crecimiento radicular y sostenibilidad de los agroecosistemas. Sin embargo, aún son escasos los estudios que evalúen de forma integrada cómo diferentes sistemas de uso y manejo alteran los atributos físicos de Latosoles altamente intemperizados de la Amazonia Oriental. El objetivo de este estudio fue evaluar los efectos del bosque nativo, pastizal, plantío convencional y plantío directo sobre la materia orgánica, densidad del suelo, porosidad total, microporosidad y macroporosidad de un Latosol Amarillo muy arcilloso ubicado en el municipio de Paragominas, Pará. El experimento se condujo en diseño completamente al azar, utilizando muestras deformadas e indeformadas recolectadas en seis profundidades, entre 0,00 y 0,80 m. Los atributos físicos se determinaron según metodologías estandarizadas de la Embrapa, y los resultados se sometieron a análisis estadístico mediante la prueba de Scott-Knott ($p \leq 0,05$). Los mayores contenidos de materia orgánica y de porosidad total se observaron en el bosque nativo y en el pastizal, mientras que la mayor densidad del suelo ocurrió principalmente en el pastizal y en el plantío directo. La microporosidad presentó pequeña variación entre los sistemas de manejo, indicando fuerte control ejercido por la mineralogía y por la microestructura de los agregados. Por el contrario, la macroporosidad mostró elevada sensibilidad a las

alteraciones promovidas por el manejo, constituyendo el atributo físico más responsivo a las modificaciones estructurales del suelo. La interpretación integrada de los resultados demostró que la materia orgánica actúa como principal agente estabilizador de la estructura del suelo, mientras que la densidad y la macroporosidad reflejan directamente la intensidad de las intervenciones antrópicas. Se concluye que evaluaciones integradas de los atributos físicos permiten comprender de forma más consistente la calidad estructural de Latosoles amazónicos, proporcionando subsidios para el desarrollo de sistemas de manejo más sostenibles en la Amazonia Oriental.

Palabras clave: Calidad Física del Suelo. Latosol Amarillo. Plantío Directo. Porosidad del Suelo. Amazonia Oriental.

1 INTRODUÇÃO

O solo constitui um recurso natural estratégico para a produção de alimentos, regulação do ciclo hidrológico, armazenamento de carbono e manutenção da biodiversidade terrestre. Além de sustentar o crescimento vegetal, o solo desempenha funções essenciais na prestação de serviços ecossistêmicos, influenciando diretamente a produtividade agrícola, a qualidade da água e a estabilidade climática. Entretanto, a crescente intensificação dos sistemas agrícolas tem promovido alterações significativas em sua estrutura física, especialmente em regiões tropicais, onde o uso intensivo de máquinas, o revolvimento frequente e a redução dos aportes de resíduos vegetais favorecem processos de compactação, degradação estrutural, diminuição da infiltração de água e aumento da suscetibilidade à erosão (Bünemann *et al.*, 2018; FAO; ITPS, 2020).

No Brasil, a expansão agrícola ocorrida nas últimas décadas consolidou os solos tropicais como importantes áreas produtoras de grãos, fibras e biocombustíveis. Na Amazônia Oriental, particularmente no município de Paragominas, estado do Pará, a modernização agrícola ocorreu de forma acelerada, impulsionada pela adoção de novas tecnologias de produção e pelo crescimento das áreas cultivadas com soja e milho. Paralelamente, o município tornou-se referência nacional na implementação de políticas voltadas à regularização ambiental e ao desenvolvimento sustentável, coexistindo atualmente áreas de floresta nativa, pastagens, sistemas convencionais de preparo e sistemas conservacionistas, como o plantio direto. Essa diversidade de usos da terra oferece condições particularmente favoráveis para compreender como diferentes formas de manejo modificam os atributos físicos do solo ao longo do tempo (Alves, Carvalho e Silva, 2014).

A qualidade física do solo representa um dos principais componentes da qualidade do ambiente edáfico, uma vez que controla processos relacionados à infiltração e retenção de água, aeração, resistência mecânica ao crescimento radicular, difusão de gases e atividade biológica. Entre os indicadores mais utilizados destacam-se a densidade do solo, a porosidade total, a macroporosidade e a microporosidade, atributos altamente sensíveis às alterações promovidas pelo manejo agrícola. Pequenas modificações nesses parâmetros podem comprometer o desenvolvimento das culturas, reduzir a eficiência do uso da água, restringir o crescimento das raízes e diminuir a resiliência dos sistemas agrícolas frente aos eventos climáticos extremos (Bünemann *et al.*, 2018; Cherubin *et al.*, 2022).

Os efeitos do manejo sobre a qualidade física são particularmente complexos em Latossolos amazônicos. Esses solos apresentam elevado grau de intemperismo, predominância de caulinita e óxidos de ferro e alumínio, baixa atividade da fração argila e estrutura predominantemente microgranular, características que lhes conferem elevada estabilidade física sob vegetação natural, mas

também elevada sensibilidade às alterações impostas pelo uso agrícola quando ocorre redução dos teores de matéria orgânica. Diferentemente de solos temperados, cuja estabilidade estrutural depende majoritariamente de argilominerais expansivos, nos Latossolos tropicais a agregação resulta da interação entre partículas de caulinita, óxidos de ferro e alumínio, substâncias húmicas e intensa atividade biológica. Essa combinação produz agregados altamente estáveis, porém fortemente dependentes da manutenção dos aportes contínuos de carbono orgânico ao solo (Kämpf; Curi, 2012; Cherubin *et al.*, 2022).

A matéria orgânica exerce papel central nesse processo, funcionando simultaneamente como agente cimentante dos agregados, fonte de energia para a microbiota e promotora da formação de bioporos produzidos pelo crescimento radicular e pela macrofauna edáfica. Em solos altamente intemperizados da Amazônia, a estabilidade estrutural resulta da atuação conjunta de mecanismos físico-químicos e biológicos, nos quais os compostos orgânicos estabelecem ligações entre partículas minerais e superfícies recobertas por óxidos de ferro, aumentando a resistência dos agregados à desagregação causada pelo impacto das gotas de chuva e pelas operações mecanizadas. Dessa forma, reduções no estoque de carbono orgânico frequentemente se refletem em aumentos da densidade do solo, diminuição da macroporosidade e restrição da condutividade hidráulica, afetando diretamente o funcionamento do sistema solo-planta-atmosfera (Blanco-Canqui; Ruis, 2018).

Nesse contexto, sistemas conservacionistas, particularmente o plantio direto, vêm sendo amplamente reconhecidos como importantes estratégias para promover a conservação física dos solos agrícolas. A manutenção permanente da cobertura vegetal, associada à redução do revolvimento, favorece o incremento do carbono orgânico, reduz perdas por erosão, melhora a estabilidade dos agregados e aumenta a continuidade dos poros ao longo do perfil. Entretanto, os benefícios do plantio direto dependem de diversos fatores, incluindo tempo de implantação, intensidade do tráfego de máquinas, rotação de culturas, textura, mineralogia e condições climáticas. Em Latossolos muito argilosos, por exemplo, incrementos temporários na densidade superficial podem coexistir com elevada estabilidade estrutural e adequada funcionalidade hidráulica, evidenciando que a interpretação isolada da densidade do solo nem sempre representa adequadamente a qualidade física do ambiente edáfico (Blanco-Canqui; Ruis, 2018; Zhang *et al.*, 2022).

Embora numerosos estudos tenham investigado os efeitos de sistemas conservacionistas em regiões agrícolas brasileiras, ainda permanecem importantes lacunas relacionadas aos Latossolos Amarelos muito argilosos da Amazônia Oriental. Grande parte das pesquisas concentra-se na camada superficial do solo ou compara apenas dois sistemas de manejo, limitando a compreensão integrada das modificações estruturais promovidas pela conversão da floresta em pastagens e áreas agrícolas

conduzidas sob preparo convencional ou plantio direto. Além disso, poucos trabalhos avaliam simultaneamente diferentes profundidades do perfil, aspecto fundamental para compreender os processos de compactação, reorganização estrutural e redistribuição da porosidade em ambientes altamente intemperizados (Hartmann & Six, 2023; Blanco-Canqui & Ruis, 2018; Bünemann *et al.*, 2018; Cherubin *et al.*, 2022).

Essa lacuna científica torna-se ainda mais relevante diante da expansão contínua da agricultura mecanizada sobre os solos amazônicos. A compreensão dos efeitos do manejo sobre os atributos físicos fornece informações essenciais para o planejamento de práticas agrícolas sustentáveis, permitindo definir estratégias capazes de preservar a estrutura do solo, aumentar a eficiência no uso da água, reduzir riscos de degradação física e ampliar a resiliência dos sistemas produtivos frente às mudanças climáticas. Sob essa perspectiva, a avaliação integrada da densidade, porosidade total, macroporosidade e microporosidade constitui importante ferramenta para o monitoramento da qualidade física do solo e para o desenvolvimento de indicadores aplicáveis ao manejo conservacionista em ambientes tropicais (FAO; ITPS, 2020; Cherubin *et al.*, 2022).

Diante desse cenário, o presente estudo teve como objetivo avaliar os efeitos de diferentes sistemas de manejo sobre os atributos físicos de um Latossolo Amarelo muito argiloso no município de Paragominas, Pará, utilizando como indicadores a densidade do solo, a porosidade total, a macroporosidade e a microporosidade ao longo de diferentes profundidades do perfil. Hipotetizou-se que sistemas conservacionistas, especialmente o plantio direto, promovem melhorias graduais na qualidade física do solo em comparação ao preparo convencional, aproximando seus atributos daqueles observados sob floresta nativa, sobretudo em decorrência da maior conservação da matéria orgânica e da estabilidade estrutural. Espera-se que os resultados contribuam para ampliar o entendimento dos mecanismos que regulam o comportamento físico dos Latossolos amazônicos submetidos a diferentes formas de uso da terra, fornecendo bases científicas para o aperfeiçoamento de práticas agrícolas sustentáveis e para a conservação dos recursos edáficos na Amazônia.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 ÁREA DE ESTUDO

O estudo foi conduzido durante o segundo semestre de 2015 em uma área experimental localizada no município de Paragominas, região sudeste do estado do Pará, Brasil, aproximadamente nas coordenadas **2°59' S e 47°21' W**, a uma altitude média de **89 m**. O município está inserido na porção oriental da Amazônia brasileira, constituindo uma das principais regiões produtoras de grãos da

Amazônia Legal, com forte expansão da agricultura mecanizada nas últimas décadas (Alves, Carvalho e Silva, 2014).

Segundo a classificação climática de Köppen-Geiger, o clima regional é do tipo **Aw** (tropical sazonal), caracterizado por temperaturas elevadas durante todo o ano e marcada sazonalidade da precipitação. A precipitação média anual é de aproximadamente **1.740 mm**, concentrando-se entre os meses de dezembro e maio, enquanto o período relativamente seco ocorre entre julho e novembro. A temperatura média anual situa-se em torno de **26,3 °C**, com umidade relativa média próxima de **85%**, condições típicas da Amazônia Oriental e que exercem forte influência sobre a dinâmica da matéria orgânica, da atividade biológica e dos processos físicos do solo (Alves, Carvalho e Silva, 2014).

A paisagem regional é composta predominantemente por relevo suave ondulado, favorecendo a mecanização agrícola e reduzindo limitações relacionadas à declividade. O material de origem é constituído principalmente por sedimentos altamente intemperizados da Formação Barreiras (Rodrigues *et al.*, 2003), originando solos profundos, bem drenados e com elevado grau de evolução pedogenética.

O solo da área experimental foi classificado originalmente como **Latossolo Amarelo Distrófico textura muito argilosa**, originados de sedimentos da Formação Barreiras (Santos *et al.*, 2025; Rodrigues *et al.*, 2003). Considerando a atualização do Sistema Brasileiro de Classificação de Solos, recomenda-se apresentar sua classificação conforme a 6ª edição do SiBCS, atualmente adotada como referência nacional (Santos *et al.*, 2025).

Os Latossolos Amarelos da Amazônia Oriental caracterizam-se por apresentarem elevado grau de intemperismo, predominância de caulinita e óxidos de ferro e alumínio na fração argila, baixa atividade mineralógica e estrutura granular muito estável quando sob vegetação natural. Essas características conferem elevada permeabilidade, boa drenagem e reduzida suscetibilidade à erosão quando o solo permanece protegido pela cobertura vegetal. Entretanto, alterações no uso da terra, especialmente aquelas associadas ao revolvimento intenso, ao tráfego de máquinas agrícolas e à redução dos estoques de matéria orgânica, podem modificar significativamente atributos físicos como densidade, porosidade e estabilidade estrutural, afetando diretamente o funcionamento hidráulico e mecânico do solo (Kämpf; Curi, 2012; Bünemann *et al.*, 2018).

A área experimental compreendeu quatro sistemas contrastantes de uso da terra, representando diferentes níveis de intervenção antrópica sobre o solo: floresta nativa, pastagem, preparo convencional e sistema plantio direto. A utilização simultânea desses sistemas permitiu comparar condições próximas ao estado natural do solo com diferentes intensidades de manejo agrícola, possibilitando avaliar as modificações promovidas sobre seus atributos físicos ao longo do perfil.

Essas informações são importantes para interpretar adequadamente os efeitos cumulativos do manejo sobre a qualidade física do solo, uma vez que modificações estruturais em Latossolos tropicais dependem não apenas do sistema atualmente utilizado, mas também da intensidade e da duração das intervenções antrópicas ao longo do tempo (Blanco-Canqui; Ruis, 2018; Cherubin *et al.*, 2022).

2.2 CARACTERIZAÇÃO DOS SISTEMAS DE MANEJO

Foram avaliados quatro sistemas contrastantes de uso e manejo do solo, representando diferentes níveis de intervenção antrópica sobre um Latossolo Amarelo muito argiloso da Amazônia Oriental: **Floresta Nativa (MATA)**, **Pastagem (PAST)**, **Sistema de Plantio Convencional (SPC)** e **Sistema Plantio Direto (SPD)**. A seleção desses sistemas teve como objetivo representar um gradiente de intensidade de manejo, permitindo comparar condições naturais do solo com diferentes estratégias de exploração agrícola.

A área de **Floresta Nativa (MATA)** foi utilizada como referência das condições originais do solo, sendo constituída por um fragmento de Floresta Ombrófila Densa preservada, característico da região de Paragominas. Nesse ambiente, o solo permanece permanentemente protegido pela cobertura florestal, apresentando deposição contínua de serapilheira, elevada atividade biológica e mínima interferência antrópica. Essas condições favorecem a manutenção da estrutura natural do solo, elevada estabilidade de agregados, abundância de bioporos e adequada distribuição dos poros, sendo frequentemente utilizadas como referência para estudos de qualidade física em solos tropicais (Hartmann & Six, 2023; Bünemann *et al.*, 2018).

O sistema **Pastagem (PAST)** era composto por cultivo estabelecido de Brachiaria brizantha cv. Marandu, submetido ao pastejo bovino.

Em sistemas de pastagem, a presença de gramíneas tropicais favorece elevados aportes de biomassa radicular e incremento de matéria orgânica, contribuindo para a formação de agregados estáveis. Entretanto, o tráfego contínuo de animais pode aumentar a densidade do solo e reduzir a macroporosidade superficial, especialmente quando associado ao manejo inadequado da lotação (Cherubin *et al.*, 2022).

O **Sistema de Plantio Convencional (SPC)** compreendeu área agrícola conduzida mediante preparo periódico do solo, envolvendo revolvimento mecânico antes da semeadura das culturas anuais.

O preparo convencional promove ruptura dos agregados, redução da continuidade dos macroporos e aceleração da mineralização da matéria orgânica, podendo resultar em alterações significativas na densidade e na distribuição da porosidade ao longo do perfil, principalmente em solos altamente intemperizados (Blanco-Canqui; Ruis, 2018).

O **Sistema Plantio Direto (SPD)** consistiu em área agrícola conduzida sob ausência de revolvimento do solo, realizando-se a semeadura diretamente sobre os resíduos vegetais deixados pela cultura anterior. Nesse sistema, a cobertura permanente do solo reduz o impacto direto das gotas de chuva, minimiza perdas por erosão, favorece o acúmulo de carbono orgânico e contribui para a conservação da estrutura física do solo.

Embora o plantio direto seja amplamente reconhecido como um dos principais sistemas conservacionistas, seus efeitos sobre os atributos físicos dependem do tempo de adoção, da textura, da mineralogia do solo e da intensidade das operações mecanizadas. Em Latossolos muito argilosos, podem ocorrer aumentos temporários da densidade superficial sem comprometimento da funcionalidade estrutural do solo, desde que haja adequada continuidade dos poros e manutenção dos estoques de matéria orgânica (Blanco-Canqui; Ruis, 2018; Zhang *et al.*, 2022).

A comparação simultânea entre esses quatro sistemas permitiu avaliar diferentes estágios de alteração física do solo decorrentes do uso da terra, abrangendo desde condições naturais até ambientes submetidos à mecanização agrícola intensiva. Essa abordagem possibilita compreender de forma integrada as modificações promovidas pelo manejo sobre a densidade, a porosidade e a organização estrutural do perfil, fornecendo subsídios para o desenvolvimento de práticas agrícolas voltadas à conservação dos Latossolos da Amazônia.

2.3 DELINEAMENTO EXPERIMENTAL

O estudo foi conduzido utilizando delineamento inteiramente casualizado, considerando quatro sistemas de uso e manejo do solo (Floresta Nativa – MATA; Pastagem – PAST; Sistema de Plantio Convencional – SPC; e Sistema Plantio Direto – SPD) e seis profundidades de amostragem (0,00–0,10; 0,10–0,20; 0,20–0,30; 0,30–0,40; 0,40–0,60 e 0,60–0,80 m). Essa estratégia experimental permitiu avaliar simultaneamente os efeitos do manejo e da profundidade sobre os atributos físicos do solo, bem como suas possíveis interações.

Cada sistema de manejo foi considerado uma condição distinta de uso da terra, representando diferentes níveis de intervenção antrópica sobre um mesmo ambiente pedoclimático. A adoção de múltiplas profundidades teve como finalidade caracterizar a distribuição vertical dos atributos físicos do perfil, permitindo identificar modificações estruturais tanto nas camadas superficiais, mais diretamente influenciadas pelas operações agrícolas, quanto nas camadas subsuperficiais, onde alterações decorrentes do manejo tendem a ocorrer de forma mais gradual.

Em cada sistema de manejo foram coletadas amostras deformadas e indeformadas em seis profundidades previamente estabelecidas. As amostras indeformadas foram utilizadas para

determinação dos atributos físicos relacionados à estrutura do solo, enquanto as amostras deformadas destinaram-se às análises laboratoriais de matéria orgânica.

Foram obtidas três amostras indeformadas por profundidade em cada sistema de manejo, utilizando anéis volumétricos metálicos, totalizando 72 amostras indeformadas, conforme descrito no experimento original. As amostras deformadas foram coletadas nas mesmas profundidades para determinação do teor de matéria orgânica, permitindo relacionar os atributos físicos com o conteúdo de carbono orgânico presente no solo.

A seleção das profundidades amostradas foi definida de forma a representar todo o perfil explorado pelo sistema radicular das culturas e permitir avaliar possíveis alterações estruturais induzidas pelo manejo agrícola ao longo da profundidade. As camadas superficiais (0,00–0,20 m) concentram a maior intensidade de operações mecanizadas e os maiores aportes de resíduos vegetais, enquanto as camadas intermediárias e profundas permitem identificar processos de compactação subsuperficial e modificações estruturais acumuladas ao longo do tempo (Blanco-Canqui; Ruis, 2018).

Buscou-se minimizar fontes de variabilidade não relacionadas aos tratamentos mediante a seleção de áreas localizadas sob condições semelhantes de relevo, classe de solo e material de origem, reduzindo a influência de fatores edáficos e topográficos sobre as variáveis analisadas.

Essa padronização experimental permitiu que as diferenças observadas entre os tratamentos fossem atribuídas predominantemente aos distintos sistemas de manejo, reduzindo a interferência de fatores ambientais externos e aumentando a robustez das comparações estatísticas realizadas.

2.4 AMOSTRAGEM DO SOLO

A campanha de amostragem foi realizada durante o segundo semestre de 2015, contemplando os quatro sistemas de manejo descritos anteriormente. As coletas foram efetuadas em período de condições climáticas relativamente estáveis, buscando minimizar possíveis variações temporais nos atributos físicos do solo decorrentes de alterações no conteúdo de água.

Em cada sistema de manejo foram coletadas amostras deformadas e indeformadas nas profundidades de **0,00–0,10; 0,10–0,20; 0,20–0,30; 0,30–0,40; 0,40–0,60 e 0,60–0,80 m**, permitindo caracterizar a distribuição vertical dos atributos físicos do solo ao longo do perfil.

As amostras deformadas foram obtidas utilizando trado de aço inoxidável, após remoção da cobertura vegetal superficial e da serapilheira quando presente, evitando a incorporação de resíduos orgânicos não pertencentes ao horizonte mineral. O solo coletado em cada profundidade foi acondicionado em sacos plásticos devidamente identificados e posteriormente transportado ao laboratório para secagem ao ar, destorroamento manual e peneiramento em malha de 2 mm, obtendo-se

a fração denominada Terra Fina Seca ao Ar (TFSA), utilizada nas determinações laboratoriais subsequentes (Teixeira *et al.*, 2017).

As amostras indeformadas destinadas às determinações dos atributos físicos foram coletadas utilizando anéis volumétricos metálicos com volume aproximado de **100 cm³**, cuidadosamente introduzidos no solo de forma a preservar sua estrutura natural e minimizar alterações na distribuição dos poros. Após a coleta, os anéis foram nivelados em ambas as extremidades, identificados individualmente e acondicionados em recipientes apropriados para transporte até o laboratório.

Foram obtidas três amostras indeformadas para cada profundidade em cada sistema de manejo, totalizando **72 amostras indeformadas**, conforme previsto no delineamento experimental. Esse número de repetições permitiu estimar adequadamente a variabilidade dos atributos físicos avaliados, reduzindo o efeito da heterogeneidade natural do solo sobre as análises estatísticas.

Durante toda a etapa de coleta foram adotados procedimentos destinados a preservar a integridade física das amostras, evitando vibrações excessivas, deformações mecânicas ou perdas de material. As amostras permaneceram identificadas individualmente durante todas as etapas laboratoriais, garantindo sua rastreabilidade desde a coleta até a obtenção dos resultados analíticos.

A adoção simultânea de amostras deformadas e indeformadas permitiu integrar informações relacionadas à matéria orgânica do solo e à sua estrutura física, possibilitando posteriormente analisar as relações entre carbono orgânico, densidade do solo, porosidade total, macroporosidade e microporosidade sob diferentes sistemas de manejo.

Essas informações aumentarão a reprodutibilidade metodológica do estudo e atenderão às recomendações atuais para descrição de protocolos experimentais em estudos de física do solo (ISO 11272, 2017; Teixeira *et al.*, 2017).

2.5 DETERMINAÇÃO DOS ATRIBUTOS FÍSICOS DO SOLO

A caracterização física do solo foi realizada utilizando amostras deformadas e indeformadas coletadas nos diferentes sistemas de manejo e profundidades previamente descritos. As análises laboratoriais foram conduzidas segundo metodologias consolidadas para estudos de física do solo, empregando protocolos recomendados pela Embrapa e amplamente utilizados em pesquisas desenvolvidas em solos tropicais (Teixeira *et al.*, 2017).

2.5.1 Matéria orgânica do solo

As amostras deformadas foram inicialmente secas ao ar, destorroadas manualmente e peneiradas em malha de 2 mm para obtenção da Terra Fina Seca ao Ar (TFSA). A determinação do

carbono orgânico do solo foi realizada pelo método de oxidação úmida com dicromato de potássio em meio sulfúrico, conforme metodologia descrita pela Embrapa.

Posteriormente, os teores de matéria orgânica (MO) foram estimados a partir da concentração de carbono orgânico utilizando o fator convencional de 1,724, conforme a expressão:

$$\mathbf{MO\ (g\ kg^{-1}) = Carbono\ Orgânico \times 1{,}724} \quad (1)$$

Embora métodos instrumentais por combustão seca apresentem maior precisão analítica, o método de oxidação úmida permanece amplamente empregado em levantamentos de fertilidade e estudos comparativos conduzidos em solos tropicais, possibilitando adequada comparação com investigações anteriormente realizadas na Amazônia (Teixeira *et al.*, 2017).

2.5.2 Densidade do solo

A densidade do solo (Ds) foi determinada utilizando amostras indeformadas coletadas em anéis volumétricos metálicos de aproximadamente 100 cm³. Após a coleta, as amostras foram saturadas, secas em estufa de circulação forçada a **105 ± 2 °C**, até massa constante, sendo posteriormente pesadas em balança analítica.

A densidade do solo foi obtida pela razão entre a massa de solo seco e o volume interno conhecido do anel volumétrico, sendo os resultados expressos em Mg m^{-3}, conforme metodologia descrita por Teixeira *et al.* (2017) e compatível com a norma ISO 11272 (2017).

A densidade do solo constitui um dos principais indicadores da qualidade física, refletindo alterações na organização estrutural do solo decorrentes do manejo agrícola, especialmente em ambientes submetidos ao tráfego de máquinas e ao pastejo animal.

2.5.3 Densidade de partículas e porosidade total

A porosidade total (Pt) foi estimada a partir da relação entre a densidade do solo (Ds) e a densidade de partículas (Dp), utilizando a expressão:

$$\mathbf{Pt = 1-(Ds/Dp)} \quad (2)$$

sendo os resultados expressos em $m^3\ m^{-3}$, adotando-se o valor convencional de **2,65 Mg m^{-3}** para a densidade de particulas

Caso tenha sido determinada experimentalmente, descrever o método utilizado (picnômetro, balão volumétrico ou equivalente).

2.5.4 Microporosidade

A microporosidade (Mi) foi determinada a partir da curva de retenção de água do solo, utilizando amostras indeformadas previamente saturadas e submetidas à tensão matricial correspondente a **6 kPa**, conforme metodologia recomendada pela Embrapa para estudos de física do solo.

Após o equilíbrio hidráulico, determinou-se o volume de água retido na amostra, correspondente ao volume ocupado pelos microporos, sendo os resultados expressos em $m^3\ m^{-3}$.

2.5.5 Macroporosidade

A macroporosidade (Ma) foi obtida por diferença entre a porosidade total e a microporosidade, conforme procedimento amplamente empregado em estudos de física do solo:

$$\mathbf{Ma = Pt - Mi)} \quad (3)$$

Esse procedimento permite estimar o volume de poros responsáveis principalmente pela infiltração de água, difusão gasosa e crescimento radicular, sendo considerado um dos principais indicadores da qualidade estrutural de solos agrícolas.

A avaliação integrada da matéria orgânica, densidade do solo, porosidade total, microporosidade e macroporosidade possibilitou caracterizar as alterações promovidas pelos diferentes sistemas de manejo sobre a estrutura física do Latossolo Amarelo estudado.

2.6 ANÁLISE ESTATÍSTICA

Os dados obtidos para matéria orgânica, densidade do solo, porosidade total, macroporosidade e microporosidade foram inicialmente organizados em planilhas eletrônicas e posteriormente submetidos à análise estatística com o objetivo de avaliar os efeitos dos diferentes sistemas de manejo sobre os atributos físicos do solo ao longo das profundidades estudadas.

A análise dos dados foi conduzida considerando delineamento inteiramente casualizado, utilizando os quatro sistemas de manejo como tratamentos e as seis profundidades de amostragem como níveis de avaliação do perfil do solo.

As médias dos tratamentos foram comparadas pelo teste de **Scott-Knott**, adotando-se nível de significância de **5% ($p \leq 0,05$)**, utilizando o programa estatístico **SISVAR**, versão desenvolvida por Ferreira (2011). O teste de Scott-Knott foi escolhido por permitir o agrupamento de médias

homogêneas, reduzindo ambiguidades frequentemente observadas em testes de comparações múltiplas tradicionais e apresentando ampla utilização em experimentos agronômicos conduzidos no Brasil.

Os resultados foram apresentados na forma de médias acompanhadas pelas respectivas letras indicativas dos agrupamentos estatísticos. Letras minúsculas foram utilizadas para comparar profundidades dentro de cada sistema de manejo, enquanto letras maiúsculas indicaram comparações entre sistemas de manejo dentro de cada profundidade, conforme estabelecido pelo teste de Scott-Knott ao nível de 5% de probabilidade.

Todas as análises estatísticas foram conduzidas utilizando o software **SISVAR**, amplamente empregado em experimentos agrícolas para análise de variância e comparação de médias (Ferreira, 2011).

Os resultados estatísticos foram interpretados conjuntamente com os processos físicos que governam a organização estrutural dos Latossolos altamente intemperizados da Amazônia, permitindo discutir os efeitos dos diferentes sistemas de manejo sobre a qualidade física do solo em uma perspectiva integrada, considerando simultaneamente matéria orgânica, densidade, porosidade total, macroporosidade e microporosidade.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 MATÉRIA ORGÂNICA DO SOLO

Os teores de matéria orgânica (MO) variaram de **9,58 a 20,03 g kg^{-1}**, evidenciando diferenças entre os sistemas de manejo e ao longo do perfil do solo (Tabela 1). De maneira geral, observou-se maior concentração de matéria orgânica nas camadas superficiais, seguida de redução gradual em profundidade, comportamento típico de Latossolos altamente intemperizados submetidos tanto à vegetação natural quanto ao uso agrícola. Essa distribuição vertical reflete o predomínio dos aportes de resíduos vegetais na superfície do solo, associados à intensa atividade biológica e à concentração do sistema radicular nas camadas mais superficiais (Bünemann *et al.*, 2018; Lal, 2020).

Na camada de **0,00–0,10 m**, os maiores teores de matéria orgânica foram observados na área de **pastagem (20,03 g kg^{-1})**, seguida da **floresta nativa (19,42 g kg^{-1})**, enquanto os menores valores ocorreram nos sistemas de **plantio convencional (16,30 g kg^{-1})** e **plantio direto (16,98 g kg^{-1}**). Esse comportamento evidencia que a presença contínua de gramíneas forrageiras pode promover elevado aporte de carbono ao solo por meio da intensa renovação do sistema radicular, frequentemente superior ao aporte observado em culturas anuais. Além disso, a decomposição contínua de raízes finas contribui significativamente para a formação da matéria orgânica associada às frações minerais, favorecendo a estabilidade estrutural do solo (Cherubin *et al.*, 2022; Hartmann & Six, 2023).

Embora a floresta nativa tenha apresentado valores ligeiramente inferiores aos observados na pastagem superficial, seus teores permaneceram elevados ao longo do perfil quando comparados aos sistemas agrícolas. Esse comportamento pode ser atribuído ao aporte permanente de serapilheira, à elevada diversidade vegetal e à intensa atividade da fauna edáfica, fatores que promovem contínua incorporação de resíduos orgânicos e favorecem a formação de agregados estáveis. Em ambientes florestais amazônicos, a ciclagem de nutrientes ocorre predominantemente na superfície do solo, sustentando elevados níveis de carbono orgânico mesmo em solos naturalmente pobres em nutrientes (Quesada *et al.*, 2011).

Nos sistemas agrícolas observou-se comportamento distinto. Tanto o plantio convencional quanto o plantio direto apresentaram menores teores superficiais de matéria orgânica quando comparados à floresta e à pastagem. No preparo convencional, esse resultado é compatível com o revolvimento periódico do solo, que favorece maior aeração, acelera a decomposição microbiana da matéria orgânica e aumenta as taxas de mineralização do carbono. A ruptura dos agregados durante as operações mecanizadas também expõe matéria orgânica anteriormente protegida fisicamente, intensificando sua decomposição (Blanco-Canqui; Ruis, 2018).

Por outro lado, embora o sistema plantio direto seja reconhecido como uma prática conservacionista capaz de aumentar os estoques de carbono no longo prazo, os resultados observados neste estudo indicam que seus benefícios sobre a matéria orgânica ainda não haviam atingido níveis comparáveis aos da floresta ou da pastagem. Essa resposta pode estar relacionada ao tempo de implantação do sistema, ao histórico anterior de uso da área ou mesmo às condições climáticas da Amazônia Oriental, onde temperaturas elevadas e alta umidade favorecem rápida decomposição dos resíduos vegetais. Estudos de meta-análise demonstram que incrementos significativos nos estoques de carbono em sistemas plantio direto dependem de períodos prolongados de adoção, associados à rotação diversificada de culturas e à manutenção permanente da cobertura vegetal (Powlson *et al.*, 2022; Cherubin *et al.*, 2022).

Ao longo do perfil, verificou-se tendência consistente de redução da matéria orgânica em todos os sistemas de manejo. Essa diminuição decorre da redução progressiva da entrada de resíduos orgânicos em profundidade e da menor concentração de raízes finas nas camadas inferiores. Em Latossolos amazônicos, esse padrão é particularmente pronunciado devido ao intenso intemperismo, à predominância de minerais de baixa atividade e à rápida reciclagem da matéria orgânica superficial, fazendo com que grande parte do carbono permaneça concentrada nos primeiros centímetros do solo (Bünemann *et al.*, 2018; Lal, 2020).

A análise conjunta dos resultados evidencia que a matéria orgânica constitui o principal agente regulador da qualidade física do solo entre os sistemas avaliados. Além de atuar como fonte de carbono para a microbiota, a matéria orgânica exerce importante função na formação e estabilização dos agregados, aumentando a resistência da estrutura do solo à compactação e favorecendo a manutenção da macroporosidade e da infiltração de água. Em Latossolos altamente intemperizados, caracterizados pela predominância de caulinita e óxidos de ferro e alumínio, esses efeitos tornam-se ainda mais relevantes, uma vez que a estabilidade estrutural depende fortemente da interação entre compostos orgânicos e a fração mineral do solo (Hartmann & Six, 2023).

Esses resultados reforçam que diferentes sistemas de manejo promovem trajetórias distintas de acúmulo e conservação da matéria orgânica. Enquanto a floresta nativa representa a condição de equilíbrio ecológico e a pastagem favorece elevados aportes radiculares, os sistemas agrícolas dependem da adoção contínua de práticas conservacionistas capazes de aumentar a entrada de resíduos vegetais e reduzir a degradação física do solo. Dessa forma, a matéria orgânica constitui um dos indicadores mais sensíveis da qualidade física em Latossolos amazônicos e estabelece a base para interpretação das alterações observadas na densidade do solo e na distribuição da porosidade, discutidas nas seções seguintes.

Tabela 1. Valores médios de Matéria Orgânica (MO) (kg.dm^{-1}), Densidade do solo (DS) (kg.dm^{-3}), Macroporosidade (m^3.m^{-3}) e Microporosidade (Mi) (m^3.m^{-3}), em diferentes profundidades, para os sistemas de manejo estudados, no município de Paragominas-PA.

	Prof.	MO	Ds	Pt	Ma	Mi
Sistema	m	g.kg^{-1}	kg.dm^{-3}	----------m^3.m^{-3}----------		
MATA		19,42	1,01aA	0,56cB	0,42aC	0,14dC
PAST	0-0,10	20,03	1,25cC	0,48aA	0,39cA	0,10bB
SPC		16,30	1,08aB	0,56cB	0,41aB	0,15bC
SPD		16,98	1,28aC	0,50aA	0,44bC	0,06aA
Média		18,18	1,15	0,53	0,11	0,42
MATA		12,73	1,18bB	0,52bB	0,42aB	0,10cA
PAST	0,10-0,20	18,52	1,17cB	0,47aA	0,35bA	0,12bB
SPC		15,03	1,07aA	0,55cC	0,41aB	0,14bB
SPD		13,03	1,25aC	0,49aA	0,41aB	0,08aA
Média		14,83	1,17	0,51	0,11	0,40
MATA		17,84	1,20 bC	0,50aB	0,41aB	0,09cA

Fonte: Elaborada pelos autores

PAST	0,20-0,30	14,64	1,09bA	0,49bB	0,33aA	0,16cB
SPC		15,79	1,16bB	0,47aA	0,40aB	0,07aA
SPD		14,90	1,29aD	0,46aA	0,41aB	0,06aA
Média		15,79	1,18	0,48	0,09	0,39
MATA		13,59	1,23bA	0,49aB	0,42aB	0,07bA
PAST	0,30-0,40	13,09	1,21cA	0,48aB	0,38cA	0,10bB
SPC		11,18	1,19bA	0,46aA	0,41aB	0,05aA
SPD		13,80	1,25aA	0,49aB	0,42aB	0,07aA
Média		12,92	1,22	0,48	0,07	0,41
MATA		11,15	1,22bA	0,49aA	0,44aB	0,06bA

Notas: Médias seguidas por letras minúsculas iguais, entre profundidades, na coluna, e maiúscula na coluna, entre tratamentos, não diferem estatisticamente entre si, pelo teste de Scott knott (5 % de significância).

Fonte: Elaborada pelos autores

3.2 DENSIDADE DO SOLO

Os valores médios de densidade do solo (Ds) variaram entre **1,01 e 1,29 Mg m^{-3}**, evidenciando influência dos diferentes sistemas de manejo sobre a organização estrutural do Latossolo Amarelo muito argiloso (Tabela 1). De modo geral, observaram-se menores valores na área de floresta nativa e maiores valores nas áreas submetidas ao uso agrícola, especialmente sob pastagem e plantio direto, indicando modificações na estrutura física decorrentes das diferentes formas de utilização do solo.

Na camada superficial (0,00–0,10 m), a **floresta nativa apresentou a menor densidade (1,01 Mg m^{-3})**, refletindo a elevada estabilidade estrutural típica de ambientes preservados. A deposição

contínua de serapilheira, a intensa atividade da macrofauna e da microbiota e a elevada concentração de raízes finas favorecem a formação de agregados estáveis e uma rede contínua de bioporos, reduzindo naturalmente a densidade aparente do solo. Esse comportamento é amplamente descrito para Latossolos amazônicos sob vegetação nativa, nos quais a estrutura granular permanece altamente desenvolvida devido à interação entre matéria orgânica, caulinita e óxidos de ferro e alumínio (Quesada *et al.*, 2011; Hartmann & Six, 2023).

Em contraste, a **pastagem apresentou elevada densidade superficial (1,25 Mg m^{-3})**, apesar de possuir o maior teor de matéria orgânica entre os sistemas avaliados. Esse resultado evidencia que o aumento do carbono orgânico nem sempre é suficiente para compensar os efeitos físicos produzidos pelo tráfego contínuo de animais. O pisoteio bovino promove rearranjo das partículas minerais, redução do volume de macroporos e aumento da compactação superficial, especialmente em solos úmidos e de textura argilosa. Estudos recentes demonstram que pastagens manejadas sob elevadas taxas de lotação frequentemente apresentam incremento da densidade do solo, mesmo quando mantêm elevados estoques de carbono orgânico (Cherubin *et al.*, 2022).

O sistema de **plantio convencional** apresentou valores intermediários de densidade ao longo do perfil. Embora o revolvimento periódico do solo promova redução temporária da densidade superficial logo após o preparo, esse efeito tende a ser transitório. A reorganização estrutural promovida pela chuva, associada ao tráfego de máquinas agrícolas, favorece o adensamento gradual das camadas cultivadas, especialmente abaixo da profundidade de preparo. Além disso, o revolvimento frequente acelera a decomposição da matéria orgânica, reduzindo sua contribuição para a estabilidade dos agregados (Blanco-Canqui; Ruis, 2018).

O **plantio direto** apresentou comportamento particularmente interessante. Em praticamente todas as profundidades, os valores de densidade permaneceram entre os mais elevados observados no estudo, atingindo **1,29 Mg m^{-3}** na camada de 0,20–0,30 m. À primeira vista, esse resultado poderia sugerir pior qualidade física do solo. Entretanto, essa interpretação seria simplificada e potencialmente equivocada.

Diversos estudos recentes demonstram que aumentos moderados na densidade do solo sob plantio direto constituem resposta esperada da reorganização estrutural promovida pela ausência de revolvimento. Nesse sistema, a acomodação natural das partículas minerais ocorre simultaneamente ao aumento da continuidade dos bioporos produzidos por raízes e organismos do solo, permitindo que a funcionalidade hidráulica seja preservada mesmo na presença de densidades relativamente elevadas. Assim, a densidade isoladamente não deve ser utilizada como único indicador da qualidade física do

solo, sendo necessária sua interpretação conjunta com a distribuição da porosidade e com os teores de matéria orgânica (Blanco-Canqui; Ruis, 2018; Zhang *et al.*, 2022).

Outro aspecto importante observado foi a relativa estabilidade da densidade ao longo das camadas mais profundas do perfil. Em todos os sistemas, as diferenças entre manejos tenderam a diminuir abaixo de 0,40 m, indicando que os efeitos das operações agrícolas concentram-se predominantemente nas camadas superficiais e intermediárias do solo. Esse comportamento é consistente com a limitada profundidade de atuação dos implementos agrícolas e com a menor influência das atividades biológicas nas camadas inferiores do perfil (Lal, 2020).

A análise integrada dos resultados evidencia que a densidade do solo foi controlada por um conjunto de fatores atuando simultaneamente. A matéria orgânica desempenhou papel importante na redução da densidade em diversos tratamentos; entretanto, seus efeitos foram modulados pela intensidade do tráfego de máquinas, pelo pisoteio animal e pelas características mineralógicas dos Latossolos altamente intemperizados. Solos ricos em caulinita e óxidos de ferro apresentam elevada estabilidade estrutural natural, porém sua reorganização após a compactação depende fortemente da atividade biológica e da manutenção contínua dos aportes de carbono orgânico (Hartmann & Six, 2023; Cherubin *et al.*, 2022).

Esses resultados reforçam que a interpretação da densidade do solo deve ser realizada de forma integrada com outros atributos físicos. Valores relativamente elevados de densidade não necessariamente indicam degradação estrutural quando associados à manutenção da continuidade dos poros e à elevada estabilidade dos agregados. Essa abordagem integrada será aprofundada nas próximas seções, que discutem o comportamento da porosidade total, microporosidade e macroporosidade sob os diferentes sistemas de manejo.

3.3 POROSIDADE TOTAL DO SOLO

A porosidade total (Pt) apresentou comportamento inversamente relacionado à densidade do solo, variando entre os diferentes sistemas de manejo e profundidades avaliadas (Tabela 1). De maneira geral, os maiores valores foram observados na área de floresta nativa, enquanto os menores ocorreram na pastagem e, em algumas profundidades, nos sistemas agrícolas, refletindo as modificações estruturais promovidas pelos diferentes usos da terra.

Na camada superficial (0,00–0,10 m), a floresta apresentou a maior porosidade total (**0,62 m^3 m^{-3}**), diferindo dos demais sistemas de manejo. Esse resultado evidencia a elevada qualidade estrutural do solo sob vegetação nativa, caracterizada pela presença de abundantes bioporos formados pelo crescimento radicular, intensa atividade da fauna edáfica e contínuo aporte de serapilheira. Esses

processos favorecem a formação e estabilização de agregados, aumentando o volume total de poros e proporcionando condições adequadas para infiltração de água, difusão de oxigênio e desenvolvimento das raízes (Quesada *et al.*, 2011; Hartmann & Six, 2023).

Em contraste, a pastagem apresentou os menores valores de porosidade total na superfície (**0,53 $m^3\ m^{-3}$**), comportamento compatível com os maiores valores de densidade do solo observados nesse sistema. O tráfego contínuo de animais promove rearranjo das partículas minerais e redução do volume de poros, principalmente daqueles de maior diâmetro, diminuindo a porosidade total mesmo em condições de elevados teores de matéria orgânica. Estudos conduzidos em pastagens tropicais demonstram que a intensidade de pastejo constitui um dos principais fatores responsáveis pela degradação física superficial do solo, especialmente quando associada a elevadas cargas animais e condições de alta umidade (Cherubin *et al.*, 2022).

Nos sistemas agrícolas observou-se comportamento intermediário. O preparo convencional apresentou porosidade relativamente elevada imediatamente após o revolvimento do solo, porém esse efeito tende a ser temporário devido ao rearranjo natural das partículas minerais e ao tráfego de máquinas agrícolas ao longo do ciclo produtivo. Em contrapartida, o plantio direto apresentou valores de porosidade total semelhantes ou ligeiramente inferiores aos observados no preparo convencional em algumas profundidades, mesmo mantendo maiores teores de matéria orgânica e ausência de revolvimento.

Esse comportamento confirma que a porosidade total, isoladamente, não representa completamente a funcionalidade física do solo. Em sistemas de plantio direto, parte da redução da porosidade total decorre da reorganização natural da matriz do solo após vários anos sem revolvimento. Entretanto, essa reorganização frequentemente ocorre acompanhada por aumento da continuidade dos bioporos produzidos por raízes, minhocas e outros organismos do solo, preservando o fluxo de água e gases mesmo quando o volume total de poros sofre pequenas reduções. Assim, alterações moderadas da porosidade total não necessariamente indicam degradação estrutural, devendo ser interpretadas conjuntamente com a distribuição entre macro e microporos (Blanco-Canqui; Ruis, 2018; Zhang *et al.*, 2022).

Outro aspecto importante observado foi a redução gradual das diferenças entre sistemas de manejo nas camadas mais profundas do perfil. A partir de aproximadamente 0,40 m de profundidade, os valores de porosidade total tornaram-se mais homogêneos, indicando que as alterações estruturais promovidas pelo manejo concentram-se principalmente nas camadas diretamente influenciadas pelas operações agrícolas e pela atividade radicular. Esse comportamento é consistente com a limitada

profundidade de atuação dos implementos agrícolas e com o predomínio dos processos pedogenéticos naturais nas camadas inferiores do perfil (Lal, 2020).

A estreita relação inversa observada entre densidade do solo e porosidade total confirma que ambos os atributos respondem de forma integrada às alterações estruturais promovidas pelo manejo. Entretanto, essa relação não foi perfeitamente linear entre os sistemas avaliados, evidenciando que outros fatores, como mineralogia, estabilidade dos agregados e atividade biológica, também exercem influência significativa sobre a organização do espaço poroso.

Nos Latossolos altamente intemperizados da Amazônia, a estabilidade estrutural resulta da interação entre partículas de caulinita, óxidos de ferro e alumínio e compostos orgânicos associados à fração mineral. Esse arranjo produz uma estrutura granular naturalmente estável, capaz de manter elevados volumes de poros mesmo sob intensa precipitação. Entretanto, quando o manejo promove redução dos aportes de matéria orgânica ou aumento da compactação superficial, ocorre reorganização da matriz do solo e diminuição da porosidade total, comprometendo processos essenciais como infiltração de água, difusão de oxigênio e crescimento radicular (Kämpf; Curi, 2012; Hartmann & Six, 2023).

Em conjunto, os resultados demonstram que a floresta nativa representa a condição estrutural de referência para os Latossolos da Amazônia Oriental, enquanto os diferentes sistemas agrícolas promovem alterações de intensidade variável na porosidade total. Contudo, a interpretação da qualidade física do solo não deve basear-se exclusivamente nesse atributo, pois sua funcionalidade depende principalmente da distribuição do espaço poroso entre macro e microporos. Essa questão será aprofundada nas seções seguintes, que discutem separadamente o comportamento da microporosidade e da macroporosidade nos diferentes sistemas de manejo.

3.4 MICROPOROSIDADE DO SOLO

Os valores de microporosidade (Mi) apresentaram menor variação entre os sistemas de manejo quando comparados aos demais atributos físicos avaliados (Tabela 1), indicando que essa fração do espaço poroso foi menos sensível às alterações promovidas pelo uso da terra. Em geral, os valores oscilaram dentro de uma faixa relativamente estreita ao longo do perfil, evidenciando que a microporosidade é fortemente controlada pelas características intrínsecas da matriz mineral do solo e apresenta maior estabilidade frente às intervenções antrópicas.

Na camada superficial (0,00–0,10 m), observaram-se pequenas diferenças entre os sistemas de manejo, sem alterações expressivas na capacidade de retenção de água associada aos microporos. Esse comportamento contrasta com o observado para a densidade do solo e para a porosidade total, que

responderam de forma mais evidente às mudanças de manejo. A menor sensibilidade da microporosidade decorre do fato de que os microporos são constituídos principalmente pelos espaços internos da matriz dos agregados e pelos poros interpartículas de pequenas dimensões, cuja formação está intimamente relacionada à textura, à mineralogia e aos processos pedogenéticos de longo prazo (Dexter, 2004; Bünemann *et al.*, 2018).

Nos Latossolos Amarelos altamente intemperizados da Amazônia, a predominância de caulinita associada aos óxidos de ferro e alumínio favorece a formação de microagregados extremamente estáveis, conferindo elevada persistência da microporosidade mesmo após décadas de uso agrícola. Diferentemente da macroporosidade, que responde rapidamente ao revolvimento do solo, ao tráfego de máquinas e ao pisoteio animal, a microporosidade tende a permanecer relativamente constante, sendo modificada apenas quando ocorrem alterações estruturais mais intensas ou de longa duração (Kämpf; Curi, 2012; Hartmann & Six, 2023).

A relativa estabilidade da microporosidade observada neste estudo sugere que os diferentes sistemas de manejo promoveram principalmente alterações na arquitetura do espaço poroso de maior diâmetro, preservando grande parte da microestrutura interna dos agregados. Esse comportamento é frequentemente observado em Latossolos muito argilosos, nos quais os processos de agregação são fortemente estabilizados pela interação entre minerais de baixa atividade, óxidos de ferro e compostos orgânicos associados às superfícies minerais (Cherubin *et al.*, 2022).

Embora pequenas diferenças tenham sido registradas entre os tratamentos, essas variações provavelmente refletem modificações secundárias decorrentes do rearranjo estrutural provocado pelo manejo, sem alterar substancialmente a capacidade de retenção de água do solo. Em sistemas conservacionistas, a manutenção dos resíduos vegetais favorece a atividade biológica e a formação de novos bioporos, porém exerce influência relativamente limitada sobre os microporos já existentes no interior dos agregados. Da mesma forma, o preparo convencional tende a modificar principalmente os poros estruturais maiores, enquanto a microporosidade permanece fortemente condicionada à organização interna da fração argilosa (Blanco-Canqui; Ruis, 2018).

Outro aspecto relevante foi a pequena variação vertical da microporosidade ao longo do perfil. Diferentemente da matéria orgânica e da macroporosidade, que apresentaram tendência de redução ou redistribuição em profundidade, a microporosidade manteve valores relativamente uniformes entre as camadas avaliadas. Esse comportamento reforça a predominância dos fatores pedogenéticos sobre os fatores de manejo na determinação dessa propriedade física, evidenciando que a organização microscópica do solo permanece relativamente preservada mesmo após diferentes formas de utilização da terra.

Do ponto de vista funcional, a manutenção da microporosidade representa aspecto positivo para os sistemas avaliados, uma vez que esses poros são responsáveis pelo armazenamento da água disponível às plantas após a drenagem gravitacional. Entretanto, elevados valores de microporosidade, quando associados à redução da macroporosidade, podem comprometer a difusão de oxigênio e aumentar a resistência mecânica ao crescimento radicular, tornando indispensável interpretar essa variável em conjunto com os demais atributos físicos (Reynolds *et al.*, 2009).

Os resultados obtidos indicam que as diferenças observadas entre os sistemas de manejo não decorreram de modificações expressivas na microestrutura do solo, mas principalmente da reorganização dos poros estruturais maiores. Dessa forma, a microporosidade mostrou-se um atributo relativamente conservativo, refletindo predominantemente a natureza mineralógica do Latossolo Amarelo estudado e confirmando que alterações na qualidade física do solo ocorreram principalmente por modificações na distribuição e continuidade da macroporosidade.

Esses resultados reforçam que a interpretação isolada da microporosidade possui capacidade limitada para diagnosticar alterações estruturais induzidas pelo manejo agrícola. Em Latossolos altamente intemperizados, sua principal contribuição consiste em complementar a interpretação da porosidade total e da macroporosidade, permitindo compreender como a reorganização do espaço poroso influencia simultaneamente o armazenamento de água, a aeração e o funcionamento físico do solo.

3.5 MACROPOROSIDADE DO SOLO

A macroporosidade (Ma) foi o atributo físico que apresentou a resposta mais evidente às diferentes formas de uso e manejo do solo (Tabela 1), refletindo diretamente as alterações estruturais promovidas pela conversão da floresta em sistemas agrícolas e pastagens. Diferentemente da microporosidade, cuja variação foi relativamente pequena entre os tratamentos, a macroporosidade mostrou elevada sensibilidade às modificações impostas pelo manejo, evidenciando alterações na continuidade dos poros estruturais responsáveis pela infiltração de água, difusão de gases e crescimento radicular.

Na camada superficial (0,00–0,10 m), a floresta nativa apresentou os maiores valores de macroporosidade, refletindo a elevada qualidade estrutural do solo sob condições naturais. A presença contínua de raízes vivas, a intensa atividade da fauna edáfica e o permanente aporte de serapilheira promovem a formação de uma rede altamente conectada de bioporos, responsável pelo rápido movimento de água e gases no perfil. Em ambientes florestais amazônicos, esses processos biológicos representam o principal mecanismo de manutenção da estrutura física do solo, conferindo elevada

estabilidade mesmo sob condições de elevada precipitação anual (Quesada *et al.*, 2011; Hartmann & Six, 2023).

Em contraste, a pastagem apresentou redução expressiva da macroporosidade superficial, comportamento coerente com o aumento simultâneo da densidade do solo observado anteriormente. O pisoteio animal promove compressão da camada superficial, reduzindo principalmente os poros de maior diâmetro, responsáveis pela drenagem gravitacional e pela difusão de oxigênio. Diversos estudos realizados em pastagens tropicais demonstram que a compactação induzida pelo pastejo afeta prioritariamente a macroporosidade, enquanto a microporosidade tende a permanecer relativamente preservada, resultado compatível com o comportamento observado neste estudo (Cherubin *et al.*, 2022).

Os sistemas agrícolas apresentaram comportamento intermediário. No preparo convencional, o revolvimento periódico promove aumento temporário da macroporosidade imediatamente após as operações de aração e gradagem. Entretanto, esse efeito é geralmente transitório, sendo rapidamente reduzido pelo rearranjo das partículas minerais, pelo impacto das chuvas e pelo tráfego de máquinas agrícolas ao longo do ciclo de cultivo. Dessa forma, embora o preparo convencional possa apresentar maior volume inicial de macroporos, grande parte desses poros corresponde a estruturas mecanicamente instáveis, pouco persistentes ao longo do tempo (Blanco-Canqui; Ruis, 2018).

O sistema plantio direto apresentou comportamento particularmente relevante sob o ponto de vista físico. Apesar de apresentar densidade relativamente elevada em algumas camadas do perfil, a redução da macroporosidade foi menos pronunciada do que seria esperado caso houvesse degradação estrutural intensa. Esse resultado reforça que a ausência de revolvimento favorece a reorganização gradual da estrutura do solo, substituindo parte dos macroporos criados mecanicamente por uma rede de bioporos formados pelo crescimento radicular e pela atividade da fauna do solo. Assim, embora o volume total de macroporos possa ser ligeiramente inferior ao observado logo após o preparo convencional, sua continuidade e funcionalidade tendem a ser superiores em sistemas conservacionistas de longo prazo (Zhang *et al.*, 2022; Cherubin *et al.*, 2022).

A distribuição vertical da macroporosidade evidenciou que as maiores alterações ocorreram nas camadas superficiais e intermediárias do perfil, coincidindo com a zona de maior influência das operações agrícolas, do sistema radicular e do tráfego de máquinas ou animais. Em profundidades superiores a aproximadamente 0,40 m, as diferenças entre os sistemas tornaram-se progressivamente menores, indicando predominância dos processos pedogenéticos naturais sobre os efeitos diretos do manejo. Esse comportamento confirma que as alterações estruturais induzidas pelo uso da terra

concentram-se principalmente na camada explorada pelas práticas agrícolas, enquanto as camadas mais profundas preservam características próximas às condições naturais do solo (Lal, 2020).

Os resultados obtidos evidenciam ainda a estreita relação funcional entre macroporosidade, densidade do solo e matéria orgânica. Enquanto maiores teores de matéria orgânica favoreceram a formação e estabilização da estrutura do solo, o aumento da densidade promoveu redução do volume de macroporos, principalmente nos sistemas submetidos ao pisoteio animal e ao tráfego de máquinas. Entretanto, essa relação não ocorreu de forma estritamente linear, indicando que fatores como mineralogia, atividade biológica e continuidade dos bioporos exerceram influência adicional sobre a organização do espaço poroso.

Nos Latossolos Amarelos altamente intemperizados, a estabilidade estrutural resulta da interação entre caulinita, óxidos de ferro e alumínio e compostos orgânicos associados às superfícies minerais. Essa estrutura granular naturalmente estável permite elevada resistência à degradação física, desde que sejam mantidos os aportes contínuos de matéria orgânica e a atividade biológica. Quando esses processos são interrompidos ou substituídos por intenso revolvimento mecânico ou compactação superficial, ocorre redução preferencial da macroporosidade, comprometendo a infiltração de água, a aeração do solo e o crescimento radicular, mesmo sem alterações expressivas da microporosidade (Kämpf; Curi, 2012; Hartmann & Six, 2023).

Em conjunto, os resultados demonstram que a macroporosidade constituiu o atributo mais sensível para detectar alterações estruturais promovidas pelos diferentes sistemas de manejo. Enquanto a microporosidade permaneceu predominantemente controlada pela microestrutura mineral do solo, a macroporosidade registrou diretamente as modificações induzidas pelo uso da terra, tornando-se um dos indicadores mais eficientes da qualidade física dos Latossolos amazônicos. Sob essa perspectiva, sua interpretação integrada com matéria orgânica, densidade e porosidade total fornece uma visão mais abrangente do funcionamento físico do solo do que a análise isolada de qualquer um desses atributos.

3.6 INTEGRAÇÃO DOS ATRIBUTOS FÍSICOS DO SOLO

A análise integrada dos atributos físicos evidencia que os diferentes sistemas de manejo promoveram alterações estruturais distintas no Latossolo Amarelo muito argiloso estudado, refletindo a interação entre processos pedogenéticos naturais e modificações induzidas pelo uso da terra. Embora cada variável responda de forma específica às intervenções antrópicas, os resultados demonstram que matéria orgânica, densidade do solo, porosidade total, microporosidade e macroporosidade constituem componentes interdependentes de um mesmo sistema físico, cuja organização determina o funcionamento hidráulico, mecânico e biológico do solo.

A matéria orgânica destacou-se como o principal fator regulador da qualidade física entre os sistemas avaliados. Além de atuar como reservatório de carbono e energia para a microbiota, exerce papel fundamental na formação e estabilização dos agregados por meio da associação entre compostos orgânicos, minerais da fração argila e óxidos de ferro e alumínio. Em Latossolos altamente intemperizados, esses mecanismos são particularmente importantes, uma vez que a predominância de caulinita e minerais de baixa atividade reduz a capacidade de expansão da argila, tornando a estabilidade estrutural fortemente dependente da matéria orgânica e da atividade biológica (Hartmann & Six, 2023; Cherubin *et al.*, 2022).

As diferenças observadas entre os sistemas de manejo refletem distintos mecanismos de reorganização estrutural do solo. Na floresta nativa, a elevada deposição de serapilheira, a diversidade de espécies vegetais e a intensa atividade da fauna edáfica favoreceram a manutenção de uma estrutura granular altamente estável, caracterizada por baixa densidade, elevada porosidade total e abundante rede de macroporos biologicamente formados. Essa condição representa o estado de equilíbrio físico do solo sob vegetação natural e constitui importante referência para avaliação dos impactos decorrentes da conversão da floresta em sistemas agrícolas (Quesada *et al.*, 2011).

Na pastagem, embora os elevados teores de matéria orgânica tenham contribuído para preservar parte da estabilidade estrutural do solo, o efeito mecânico do pisoteio animal promoveu aumento da densidade e redução da macroporosidade superficial. Esses resultados evidenciam que o carbono orgânico, isoladamente, não é suficiente para impedir alterações estruturais quando submetido a elevadas pressões mecânicas. O equilíbrio entre aporte de resíduos vegetais e intensidade de compactação passa, portanto, a determinar a qualidade física desses ambientes (Cherubin *et al.*, 2022).

Nos sistemas agrícolas observou-se comportamento ainda mais complexo. O preparo convencional promoveu ruptura periódica dos agregados e reorganização temporária da estrutura, produzindo alterações na densidade e na distribuição da porosidade. Por outro lado, o plantio direto apresentou densidade relativamente elevada em algumas camadas do perfil, mas preservou melhor a continuidade estrutural do solo quando analisado de forma integrada. Esse resultado reforça que a ausência de revolvimento favorece a substituição gradual dos poros mecanicamente formados por bioporos permanentes originados pelo crescimento radicular e pela atividade da macrofauna, produzindo uma estrutura mais estável ao longo do tempo (Blanco-Canqui; Ruis, 2018; Zhang *et al.*, 2022).

Um aspecto particularmente importante evidenciado neste estudo refere-se ao comportamento contrastante entre microporosidade e macroporosidade. Enquanto a microporosidade permaneceu relativamente constante entre os sistemas de manejo, refletindo predominantemente características

intrínsecas da mineralogia e da microestrutura do solo, a macroporosidade apresentou elevada sensibilidade às alterações promovidas pelo manejo agrícola. Essa diferença demonstra que os impactos do uso da terra ocorreram principalmente sobre os poros estruturais de maior diâmetro, responsáveis pela infiltração de água, aeração e crescimento radicular, enquanto a organização interna dos agregados permaneceu relativamente preservada.

Essa distinção permite reconhecer dois níveis complementares de organização estrutural nos Latossolos amazônicos. O primeiro corresponde à **microestrutura pedogenética**, formada ao longo de milhares de anos pela interação entre caulinita, óxidos de ferro e alumínio, matéria orgânica e processos biológicos, apresentando elevada estabilidade frente às intervenções antrópicas. O segundo corresponde à **macroestrutura induzida pelo manejo**, muito mais dinâmica, diretamente influenciada pelo revolvimento do solo, pelo tráfego de máquinas agrícolas, pelo pisoteio animal e pelo desenvolvimento do sistema radicular. Os resultados obtidos indicam que os diferentes sistemas de manejo modificaram predominantemente essa segunda escala estrutural, preservando grande parte da organização microscópica do solo.

Sob essa perspectiva, a qualidade física do solo não deve ser interpretada a partir de um único atributo isolado. Densidade elevada pode coexistir com adequada funcionalidade estrutural quando associada à manutenção da continuidade dos macroporos biologicamente formados. Da mesma forma, elevados teores de matéria orgânica nem sempre impedem a compactação superficial quando predominam elevadas cargas mecânicas, como observado na pastagem. A interpretação integrada dos atributos físicos fornece, portanto, uma representação muito mais consistente do funcionamento do solo do que análises individuais de cada variável (Reynolds *et al.*, 2009; Bünemann *et al.*, 2018).

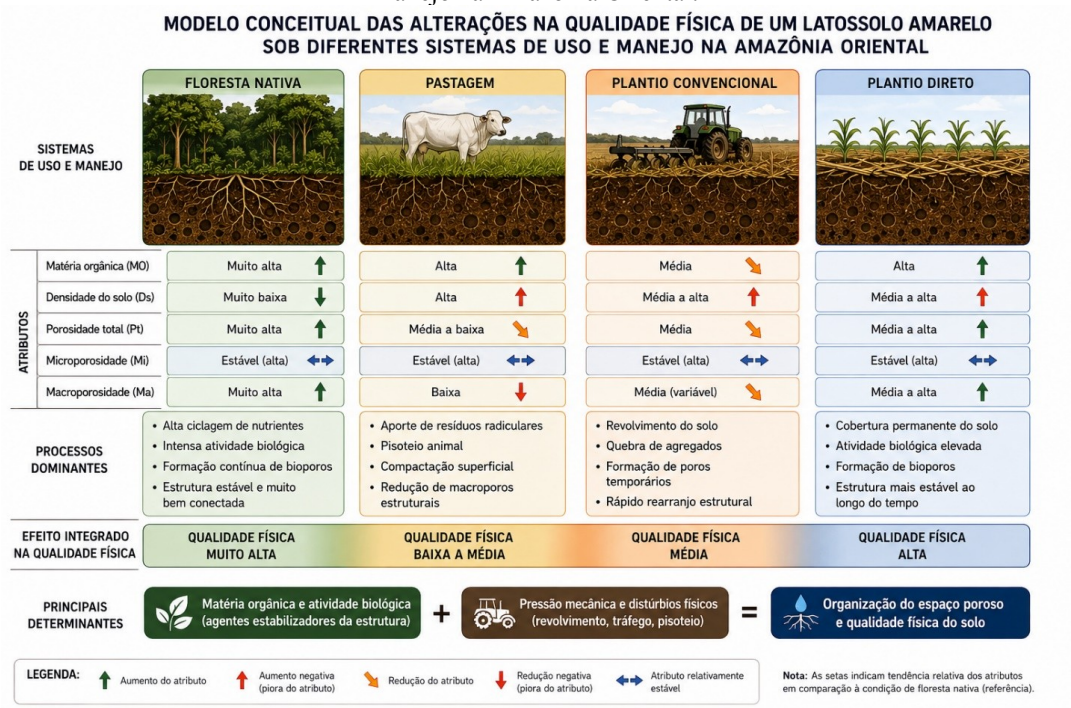
Do ponto de vista agronômico, os resultados indicam que práticas de manejo voltadas exclusivamente para o aumento dos estoques de carbono ou para a redução da densidade do solo podem ser insuficientes para promover melhoria efetiva da qualidade física. Estratégias conservacionistas devem priorizar simultaneamente a manutenção da matéria orgânica, a redução do tráfego mecanizado, o controle da intensidade de pastejo e o estímulo à atividade biológica, favorecendo a formação contínua de bioporos e a estabilidade estrutural do solo.

Finalmente, este estudo demonstra que os Latossolos altamente intemperizados da Amazônia Oriental apresentam elevada resiliência física decorrente de sua mineralogia e de sua estrutura granular natural. Entretanto, essa resiliência possui limites e depende diretamente da manutenção dos processos biológicos responsáveis pela renovação da estrutura do solo. Assim, sistemas de manejo que preservem o aporte contínuo de resíduos vegetais, reduzam o revolvimento mecânico e favoreçam a atividade

radicular tendem a conservar mais eficientemente a funcionalidade física desses solos, contribuindo para a sustentabilidade dos sistemas agrícolas desenvolvidos na Amazônia.

Com base na integração dos resultados obtidos para matéria orgânica, densidade do solo, porosidade total, microporosidade e macroporosidade, foi elaborado um modelo conceitual sintetizando os principais mecanismos responsáveis pelas alterações na qualidade física do Latossolo Amarelo sob diferentes sistemas de uso e manejo (Figura 1). O modelo evidencia que a matéria orgânica e a atividade biológica atuam como os principais agentes estabilizadores da estrutura do solo, favorecendo a formação e a manutenção de agregados e bioporos, enquanto o revolvimento mecânico, o tráfego de máquinas e o pisoteio animal constituem os principais fatores responsáveis pela reorganização do espaço poroso e pelo aumento da densidade do solo. Em conjunto, esses processos determinam a funcionalidade física do solo, influenciando diretamente sua capacidade de armazenamento e movimentação de água, a difusão de oxigênio, o crescimento radicular e, consequentemente, a sustentabilidade dos sistemas de produção agrícola na Amazônia Oriental.

Figura 1. Modelo conceitual da qualidade física de um Latossolo Amarelo muito argiloso sob diferentes sistemas de uso e manejo na Amazônia Oriental.



Nota: O modelo integra as respostas da matéria orgânica (MO), densidade do solo (Ds), porosidade total (Pt), microporosidade (Mi) e macroporosidade (Ma), evidenciando a interação entre processos pedogenéticos e fatores antrópicos na determinação da estrutura e da funcionalidade física do solo. As setas indicam tendências relativas dos atributos em comparação à condição de floresta nativa, utilizada como referência estrutural do sistema.
Fonte: Os Autores

4 CONCLUSÕES

Os diferentes sistemas de uso e manejo promoveram alterações significativas na qualidade física do Latossolo Amarelo muito argiloso da Amazônia Oriental, confirmando que a intensidade e a natureza das intervenções antrópicas modificam a organização estrutural do solo, principalmente nas camadas superficiais e intermediárias do perfil.

A floresta nativa apresentou a melhor condição física entre os sistemas avaliados, caracterizada por elevados teores de matéria orgânica, baixa densidade do solo, alta porosidade total e elevada macroporosidade, constituindo a referência estrutural para a avaliação das alterações promovidas pelos sistemas agrícolas. Em contraste, a pastagem apresentou aumento da densidade do solo e redução da macroporosidade superficial, evidenciando os efeitos da compactação induzida pelo pisoteio animal, apesar dos elevados teores de matéria orgânica.

O preparo convencional promoveu modificações na estrutura física associadas ao revolvimento periódico do solo, enquanto o sistema plantio direto apresentou reorganização estrutural distinta, caracterizada por densidade relativamente elevada em algumas camadas, porém acompanhada de melhor conservação da estrutura funcional do solo quando analisada de forma integrada com a porosidade e a matéria orgânica. Esses resultados demonstram que a densidade do solo, isoladamente, não constitui indicador suficiente para diagnosticar a qualidade física em Latossolos altamente intemperizados.

A microporosidade apresentou pequena variação entre os sistemas de manejo, indicando forte controle exercido pela mineralogia e pelos processos pedogenéticos responsáveis pela formação da microestrutura do solo. Em contrapartida, a macroporosidade mostrou-se o atributo mais sensível às alterações decorrentes do uso da terra, refletindo diretamente os efeitos do revolvimento mecânico, do tráfego de máquinas e do pisoteio animal sobre a continuidade do espaço poroso.

A interpretação integrada dos atributos físicos permitiu identificar dois níveis complementares de organização estrutural dos Latossolos amazônicos: uma microestrutura pedogenética, relativamente estável e predominantemente controlada pela mineralogia e pela formação dos agregados, e uma macroestrutura funcional, altamente dinâmica e diretamente influenciada pelas práticas de manejo. Essa distinção amplia a compreensão dos mecanismos responsáveis pela qualidade física dos solos tropicais altamente intemperizados e reforça que avaliações baseadas em um único atributo físico podem conduzir a interpretações incompletas.

Do ponto de vista agronômico, os resultados indicam que estratégias conservacionistas voltadas à manutenção da matéria orgânica, à redução do revolvimento do solo, ao controle do tráfego mecanizado e da intensidade de pastejo e ao estímulo da atividade biológica são fundamentais para

preservar a funcionalidade física dos Latossolos da Amazônia Oriental. Assim, este estudo contribui para o entendimento dos processos que regulam a estrutura física desses solos e fornece subsídios científicos para o desenvolvimento de sistemas de produção mais sustentáveis na região amazônica.

REFERÊNCIAS

ALVES, L. W. R.; CARVALHO, E. J. M.; SILVA, L. G. T. Diagnóstico agrícola do município de Paragominas, PA. Belém: Embrapa Amazônia Oriental, 2014.

BLANCO-CANQUI, H.; RUIS, S. J. No-tillage and soil physical environment. Geoderma, Amsterdam, v. 326, p. 164–200, 2018. DOI: https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2018.03.011.

BÜNEMANN, E. K. *et al.* Soil quality – A critical review. Soil Biology and Biochemistry, v. 120, p. 105–125, 2018.

CHERUBIN, M. R. *et al.* Soil health: concepts, assessment and perspectives. European Journal of Soil Science, v. 73, e13229, 2022. DOI: 10.1111/ejss.13229.

DEXTER, A. R. Soil physical quality. Part I. Theory, effects of soil texture, density, and organic matter, and effects on root growth. Geoderma, v. 120, p. 201–214, 2004.

FAO; INTERGOVERNMENTAL TECHNICAL PANEL ON SOILS (ITPS). State of Knowledge of Soil Biodiversity: Status, Challenges and Potentialities. Rome: FAO, 2020.

FERREIRA, D. F. Sisvar: a computer statistical analysis system. Ciência e Agrotecnologia, Lavras, v. 35, n. 6, p. 1039–1042, nov./dez. 2011. DOI: 10.1590/S1413-70542011000600001.

HARTMANN, M.; SIX, J. Soil structure and microbiome functions in agroecosystems. Nature Reviews Earth & Environment, London, v. 4, p. 4–18, 2023. DOI: https://doi.org/10.1038/s43017-022-00366-w.

ISO 11272. Soil quality — Determination of dry bulk density. Geneva: ISO, 2017.

KÄMPF, N.; CURI, N. Formação e evolução do solo (capítulos sobre Latossolos). In: KER, J. C. *et al.* (Org.). Pedologia: fundamentos. Viçosa: SBCS, 2012.

LAL, R. Soil organic matter content and crop yield. Journal of Soil and Water Conservation, v. 75, n. 2, p. 27A–32A, 2020.

POWLSON, D. S. *et al.* Limited potential of no-till agriculture for climate change mitigation. Nature Reviews Earth & Environment, London, v. 3, p. 684–696, 2022. DOI: https://doi.org/10.1038/s43017-022-00338-0.

QUESADA, C. A. *et al.* Soils of Amazonia with particular reference to the RAINFOR sites. Biogeosciences, v. 8, p. 1415–1440, 2011. DOI: https://doi.org/10.5194/bg-8-1415-2011.

REICHERT, J. M.; REINERT, D. J.; BRAIDA, J. A. Qualidade dos Solos e Sustentabilidade dos Sistemas Agrícolas. Ciência & Ambiente, v. 27, jul./dez. 2003.

REYNOLDS, W. D.; DRURY, C. F.; TAN, C. S.; FOX, C. A.; YANG, X. M. Use of indicators and pore volume-function characteristics to quantify soil physical quality. Geoderma, v. 152, p. 252–263, 2009. DOI: https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2009.06.009.

RODRIGUES, T. E.; SILVA, R. das C.; SILVA, J. M. L. da; OLIVEIRA JUNIOR, R. C. de; GAMA, J. R. N. F.; VALENTE, M. A. Caracterização e classificação dos solos do município de Paragominas,

Estado do Pará. Belém: Embrapa Amazônia Oriental, 2003. 49 p. (Embrapa Amazônia Oriental. Documentos, 162). Anexo mapa: Mapa de solos do Município de Paragominas - Estado do Pará.

SANTOS, H. G. *et al.* Sistema Brasileiro de Classificação de Solos. 6. ed., rev. e ampl. Brasília: Embrapa, 2025. 393 p. ISBN 978-65-5467-104-0.

SILVA, R. S. *et al.* Propriedades Físicas e Teor de Matéria Orgânica de um Latossolo Amarelo Sob Sistemas Integração Lavoura-Pecuária-Floresta. Journal of Agronomic Sciences, Umuarama, v. 4, n. 2, p. 144–157, 2015.

SOUZA, Z. M.; LEITE, J. A.; BEUTLER, A. N. Comportamento de atributos físicos de um Latossolo Amarelo sob agroecossistemas do Amazonas. Engenharia Agrícola, Jaboticabal, v. 24, n. 3, p. 654–662, set./dez. 2004.

TEIXEIRA, P. C.; DONAGEMMA, G. K.; FONTANA, A.; TEIXEIRA, W. G. (ed.). Manual de métodos de análise de solo. 3. ed. rev. e ampl. Brasília: Embrapa, 2017. 574 p. ISBN 978-85-7035-771-7.

ZHANG, Y. *et al.* Effects of conservation tillage on soil physical properties and crop productivity: A global meta-analysis. Science of the Total Environment, v. 806, 150325, 2022.